NDC 548.3

制御実験装置、2次元安定ステージの開発

津川 元 *　　若松正泰 **

Development of Controllable Stage System

Gen TSUGAWA, Masayasu WAKAMATSU

Abstract— This paper describes "Controllable Stage System" which was developed as a system to test and demonstrate availability of position and posture control devise for under water vehicles. It consists of sensors, sensor interfaces, A-D exchanger, CPU, D-A exchanger, actuator, and framework. Since the system also contains input signal generating devices, it will be available to test control algorithms and/or sensor system of the newly developed one. On the other hand, the system may be applied to facilities for general student experiment, as it is put on a compact framework.

1．はじめに

ここ数年間水中航走体の姿勢制御を取り上げて検討している。その制御システムの有効性を実証する装置として、ここに紹介する「安定ステージ」なる実験装置を開発した(3)。2次元及び3次元で使える装置として設計したが、実験補助用としては2次元用が使い易いだろう。ここでは手軽に使える2次元的な実験装置として説明する。センサ、インタフェイス、制御装置、およびアクチュエータからなるフィードバック系のシステムであるが、外乱発生装置も加えたので、一研究室での実験にとどまらず、広く学生実験に、あるいは専攻科の特別実験などにも、使用してもらえばとの意図から、ここに内容を紹介するものである。

制御装置としては、一般に工場の自動化に使用されている汎用のPC（Programmable Controller）を使用した。フィードバック実験装置としては必ずしも使いやすいわけではないが、汎用のPCを本校の学生が使い慣れていることは、将来にわたって益することが大きいと考えたからである。その意味では、アクチュエータとしてのACサーボモータも同じ目的といえる。

今回の紹介で入出力信号としては、アナログ値±10Vのみとしているが、他の入出力も可能であるし、接点信号や位置制御信号なども取り扱えるので、将来はもっと複雑な、あるいは複合化された実験装置へと発展できるようにもなっている。

2．装置の概要

本実験装置は構成上から見て、センサ部、制御部、アクチュエータ部及び外乱発生部から成っている。外観図を図 2.1 に示す。それらの構成要素が、フレーム上に一体的に組み込んである。それぞれ2セットが独立して左右に配置されており、ステージを基準点に保持するように与えられた制御アルゴリズムに則って働く装置である。ステージ上部に取り付けたセンサ部で検出した偏差（アナログ量）を制御部のPCへ送る。PCでは、AD変換モジュールでディジタル量に変換した後CPU部がこれを受け取る。CPU部では予め与えられている演算式によりこれを処理して、DA変換モジュールへ引き渡す。DA 変換モジュールでは、これをアクチュエータへの入力信号として適した形に変換して出力する。アクチュエータ部は、AC サーボモータで、その回転により、スライドスクリューを介してステージの保持部を上下させる。こうして一巡のフィードバックループを形成している。以上の制御系全体を下部で支えるのが外乱発生装置で、外乱発生装置は2台のDCモータでステージ制御装置を左右で上下させ、系に外乱を与える役目をする。この一連の関係を図 2.2 に示す。

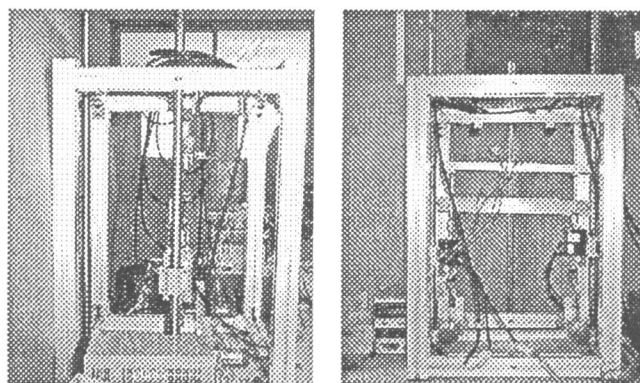



図 2.1　実験装置の外観図

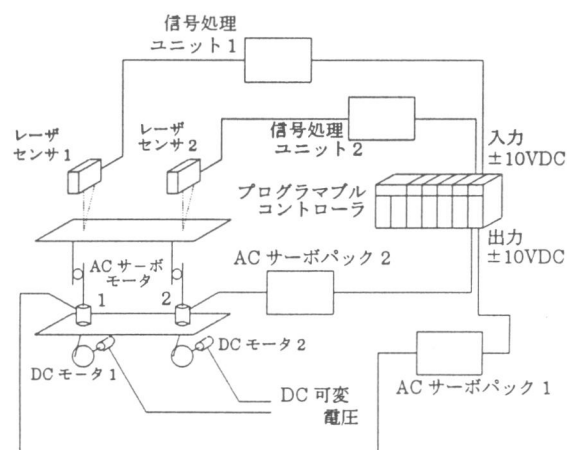



図 2.2　作動説明図

* 専攻科（機械・制御システム工学専攻）
** 電子制御工学科

平成11年8月31日受理

本装置を利用しての実験の種類としては、センサやインタフェイスの特性試験、制御数式モデルの実証、サンプリングタイムの影響等、いろいろ考えられる。制御の方法・制御式の実証実験とセンサ制御方式に関する実験では、パソコンでプログラム化した制御式をPCのCPUモジュールにダウンロードして、あるいは制御式の係数を変更して、結果を実証することができる。第8章でPID制御の適用例を示している。センサ実験では、センサの性格に応じて取り付け法を工夫する必要があるが、同じ制御方式でセンサを取り替えて結果を比較するなどのユニークな実験が可能である。検証は、標準的に装置上部に取り付けてあるレーザセンサの出力をオシロスコープに接続するなどして、ステージの位置、即ち制御結果を観察することができる。また、入力または外乱と制御結果を比較するときは、下部ステージの位置をもレーザセンサにて取り出すことにより可能となる。

3．制御を司るプログラマブル・コントローラ

横河電機製レンジフリーコントローラ"FA-M3"を使用している。コンパクトなタイプで、モジュール化されており、必要に応じて、ベースモジュール上にモジュール単位に組み立て増設可能な構造になっている。本実験に必要なモジュールは、電源、CPU, Basic CPU,アナログ入力、アナログ出力の各モジュールである。PC はもともとディジタル量を扱うのが得意で、それ用の入出力モジュールや、特殊用途のモジュールが準備されているが、今回の実験装置としては、上記のようにアナログ量を扱う組み合わせとしている。本PCの一般的な特徴は[1]、

1．高速である。――　5Kステップを 1ms のスキャンタイムで演算する。
2．コンパクト　――　147(W)×100(H)×88(D)で192点
3．柔軟性　――　最大8192点レンジフリー

等が挙げられる。

基本CPUモジュールの仕様は、

68000+シーケンス演算専用プロセッサ
入出力点数：最大2048点（DI／O）換算
制御方式：ストアードプログラムによる繰り返し演算
入出力制御方式：リフレッシュ／ダイレクト入出力命令
プログラム言語：構造化ラダー言語、ニモニック言語
命令数：基本命令24種、応用命令222種
処理速度：基本命令 0.18～0.36μs／命令、応用命令 0.36μs～／命令
プログラム容量：10Kステップ

本実験装置では、以上の基本CPUモジュールに加えて、Basic CPUモジュールを装備している。これによって、基本CPUモジュールではできない複雑なアルゴリズムや計算式による演算を可能にしている。ラダーシーケンスとのデータの授受も可能である。

アナログ入力モジュールでは、表3.1に示すように、入力信号レンジとしての電圧を、ディジタル信号値に変えてCPUモジュールに伝達する。表に示すように入力信号レンジには3種が用意されている。

表 3.1　入力モジュールの入出力変換特性

入力信号レンジ	ディジタル出力値	グラフNo.	備考
−10V～10VDC	−20000～20000	①	スケーリングなし
	−10000～20000	②	
0V～5VDC	0～10000	①	スケーリングなし
	2000～6000	③	
1V～5VDC	2000～10000	①	スケーリングなし
	−10000～10000	④	

入力信号レンジの上下限値に対応するディジタル出力値をスケーリング機能を使って、−20000～20000 の範囲で任意に設定することが出来る。プログラム上で特にスケーリングを設定しない場合には、表3.1の「スケーリングなし」欄の設定となる。図3.1には、表に示した設定の例について、それぞれグラフに表してある。

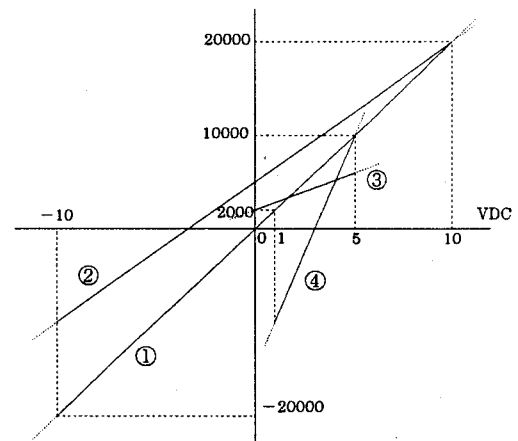



図 3.1　入力変換特性

表 3.2　出力モジュールの入出力変換特性

ディジタル入力値	出力信号レンジ	グラフNo.	備考
−20000～20000	−10V～10VDC		スケーリングなし
2000～10000	4mA～20mADC	①	スケーリングなし
−10000～10000		②	
−20000～20000		③	

アナログ出力モジュールについても、表3.2に示すように、ディジタル入力値としては2種あり、それぞれの場合について、出力信号レンジの上下限値に対応するディジタル値を、−20000～20000 の範囲で任意に設定することが出来る。図3.2には、出力信号レンジが、4～20mA の場合のスケーリングなし、−10000～10000、および−20000～20000 の場合の入出力変換特性を示す。

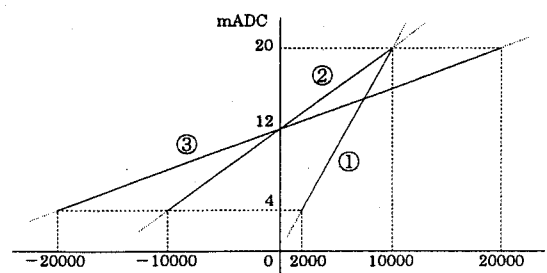



図 3.2　出力変換特性（電流出力の場合）

４．アクチュエータとしてのACサーボ機構

アクチュエータとしては、安川電機製Σシリーズ AC サーボモータ model"SGM-A3B"、およびサーボパック model"SDG-A3B"を採用している[2]。電気式アクチュエータとして一般に使われているものには、ステッピングモータ、DC サーボモータおよび AC サーボモータがある。これらの各種モータの特性を比較すると、表 4.1 のようになる。

表 4.1　各種電気式アクチュエータの特性比較[6]

	ステッピングモータ	DCサーボモータ	ACサーボモータ
速度制御の範囲	△	○	○
加減速トルクの大きさ	△	○	○
慣性モーメントの小ささ	△	○	○
小形・軽量	△	○	○
低速まで滑らかな回転	×	○	○
メインテナンスフリー性	○	×	○
環境適応性	○	△	○
インターフェイスの容易さ	○	△	△

DC サーボモータは界磁に永久磁石を用いた直流電動機を利用するものである。従って、その欠点の一つに電機子電流を整流するために、回転子上に整流機構として整流子とブラシを持っている。そのことにより、摩耗によるブラシ、整流子の手入れなどが必要になる。この保守上の難しさと整流性能の限界から、ストールトルクあるいは高速回転速度などの回転速度に制約を受ける。

AC サーボモータは、ブラシや整流子を持たないので DC サーボモータがいろいろ制約を受けていた点を改善できる。AC サーボモータには、かご形誘導電動機を用いたものと永久磁石を回転子磁極に用いた同期電動機形のものがある。後者は DC ブラシレスサーボまたは SM 形 AC サーボモータと呼ばれ、一般に AC サーボモータという場合にはこのタイプを指している。今回使用している"SGM-A3G"もこのタイプである。

その原理と特性について少し述べる。磁界中に置かれた導体に電流が流れるとフレミングの左手の法則により、導体と直角の方向に力が働く。AC サーボモータでは導体である巻線が固定子に固定されている。導体に働く力は反作用で磁石に働く。磁石に働いた力により、磁石を取り付けた回転子が回転する。このとき磁石の動きに合わせて固定子巻線に相対的に一定の関係を保った電流を流すことが出来たら、回転子は連続的に一様な力を発生する。固定子に巻かれた 120 度づつ位相のずれた３相巻線に、回転子位置に応じた PWM 制御した正弦波電流を流すと、流れる電流は次式で表される。

$$I_U = I_m \sin\theta_r$$

$$I_V = I_m \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$I_W = I_m \sin\left(\theta_r - \frac{4}{3}\pi\right)$$

I_U, I_V, I_W : phase current [A]

I_m : maximum current [A]

θ_r : rotor position [rad]

$$T_M = K_S\left\{I_U\phi\sin\theta_r + I_V\phi\sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) + I_W\phi\sin\left(\theta_r - \frac{4}{3}\pi\right)\right\}$$

$$= \frac{2}{3}K_S\phi I_m$$

K_S : constant

ϕ : effective field flux density

上式から分かるように、AC サーボモータの発生するトルクはモータの回転位置に無関係であり、電流と界磁磁束密度の積により求められ、常に一定である。界磁磁束密度は永久磁石の使用により一定であるので、AC サーボモータの発生するトルクは各巻線に流れる電流に比例する。永久磁石形同期電動機であるので、AC サーボモータの回転数 N は、周波数(f)と極数(p)によって、次式で与えられる。

$$N = \frac{60f}{4p} \quad \text{[rpm]}$$

f : frequency [Hz]

p : number of polse

AC サーボモータ"SGM-A3G"の速度―トルク特性を図 4.1 に示す。

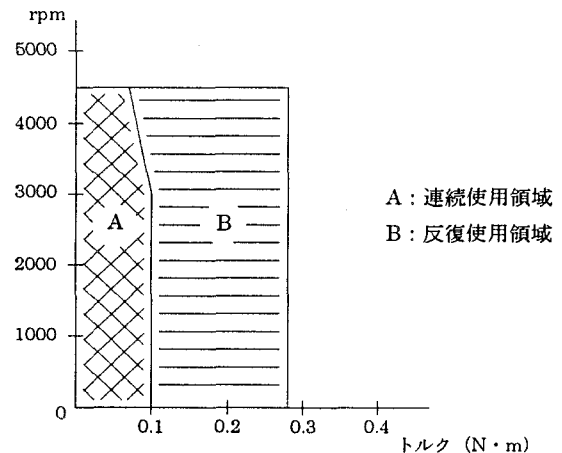



図 4.1　AC サーボモータ "SGM・A3G" の速度―トルク特性

AC サーボモータは、モータとドライバと制御回路から構成されている。AC サーボモータの基本構成図を図 4.2 に示す。

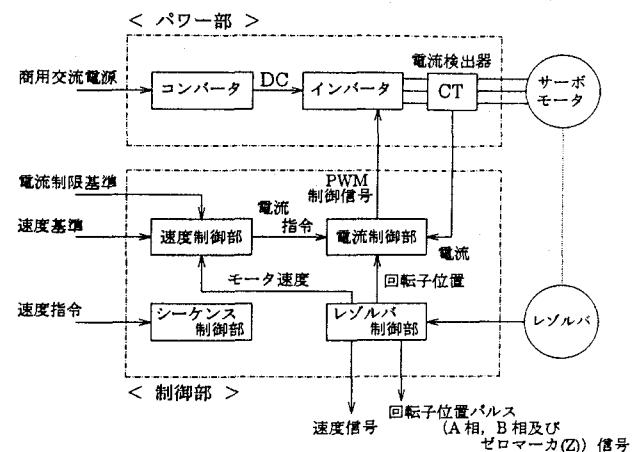



図 4.2　AC サーボモータ基準構成図

ACサーボモータは反負荷側軸端に取り付けたレゾルバにより、回転子磁極の位置を検出して、その位置に合わせた固定子巻線に正弦波電流を流すことによってトルクを発生している。パワー部はコンバータとインバータから構成されている。商用電源(AC100V,単相)を直流電源に変換し、更に必要とする周波数の交流電圧を発生し、ACサーボモータに3相正弦波電流を流す。

制御部では、外部から与えられた速度基準信号に基づいて、パワー部のインバータをPWM制御してACサーボモータに3相正弦波電流を流す。制御部は速度制御部、電流制御部、レゾルバ制御部からなっている。ACサーボドライバ主回路図を図4.3に示す。主回路は、商用電源の交流を直流に変換するコンバータ部、その直流を任意の周波数と電圧を有する交流に変換するインバータ部と回生エネルギーを吸収する回生電力吸収回路で構成されている。

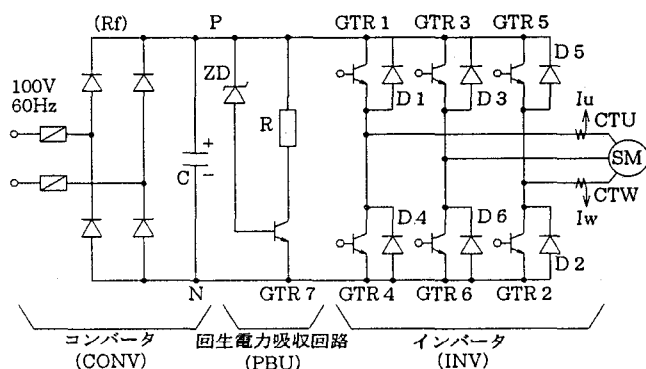



図 4.3 ACサーボドライバ主回路図

5. 外乱発生装置

第2章の外観図に示すように、装置の最下部左右に取り付けられている。ステージとアクチュエータを一体的に上下させる。左右2台の外乱発生装置は独立して制御できるので、同期させると、ステージに正弦波状の入力を与えることが出来るし、非同期的に運転すると周波数及び位相の違った外乱を与えることになる。

駆動用電動機は、DC12V,50Wの直流ギヤードモータを使用し、サイリスタによる可変電圧形速度制御方式を採用し、2台用のコントローラを1つの制御箱に組み込んである。

6. センサとインタフェイス

装置に標準的に装備しているセンサは、ディジタル表示付きレーザ変位センサ(オムロン製:3Z4M-J12226)でその仕様は下記の通りである[7]。

測定中心距離と測定範囲	:	100mm±30mm
光源	:	半導体レーザクラス3B、780nm 5mW以下
分解能	:	50μm
アナログ変位出力	:	±10VDC または 4〜20mADC
応答時間 動作・復帰	:	各1ms

コントローラの出力回路は、図6.1の通りである。

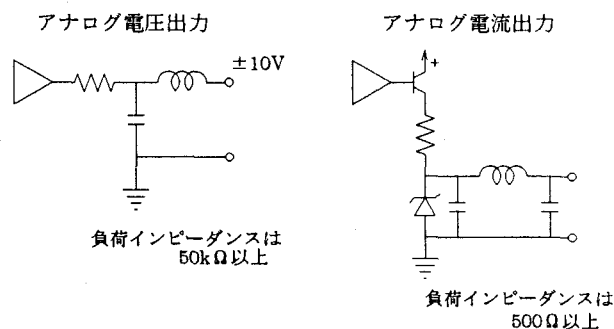



図 6.1 レーザ変位センサコントローラの出力回路

制御システムの実験の場合には、このレーザ変位センサを基本センサとして使用するが、センサの性能テストなどを行う場合には、この標準センサを入力及び出力の計測用として利用する。圧電振動ジャイロや加速度センサの特性試験を行い興味ある結果を得たがこの件については、他の機会に紹介したい。

7. ソフトウェア

ソフトウェアとしては、接点制御用のラダープログラム作成ツールとアナログ値制御用のBASIC PROGRAM作成用のツールが用意されている。本稿で説明する範囲では、後者のツールを使用する。われわれが使い慣れているBASICとは、入出力モジュールとの取り合いや、PC特有の部分については違いがあるが、その点さえ気をつければ、自由に使いこなせる。制御用ツールとしての特徴をあげると、

☆ オンラインリアルタイム処理

割り込みに対し強力にサポートされており、外部事象にプログラムが即時に応答できるよう高速化されている。オンラインリアルタイムプログラムの作成が簡単である。

☆ プログラムのブロック構造化

サブプログラムでは、変数・行番号・ラベルを独立して管理できるので、プログラムの開発、保守、再利用に便利である。

☆ シーケンスプログラムとの結合

ラダーシーケンスプログラムとの同期を行うことが出来るため、複合化した制御を可能にしている。

☆ I/Oサポート

既に述べたアナログ入出力モジュールを始め、シリアル通信モジュール、ディジタル入出力モジュールなどへのアクセスが簡単に出来る。

簡単なプログラムの例を流れ図の形に示す[6]。

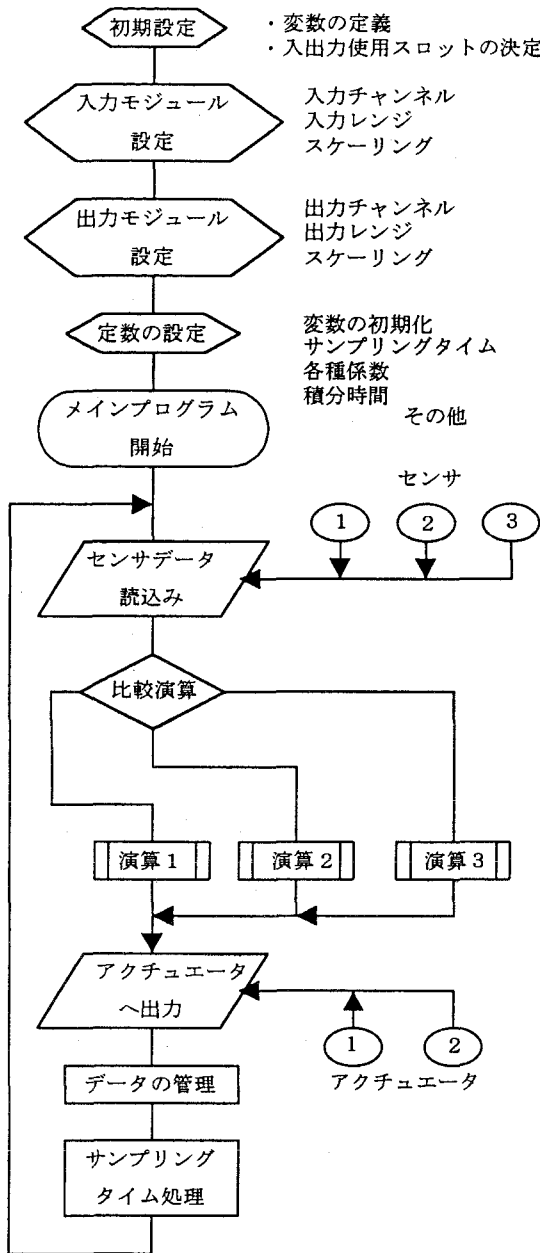



図 7.1　制御実験流れ図

8．本装置を利用した実験の一例

PID 制御実験に本装置を利用した一例を以下に紹介する[4]。センサは標準センサとして常備しているレーザセンサを利用する。レーザセンサはステージの上部左右に配置され、センサとステージ間の距離を測定する。センサからの距離 100mm の位置を基準（設定位置）として、それからの変位を時間の関数 e(t)として、1/3[V/mm]、最大±30[mm]の変位を±10[V]の電圧信号に変換して出力し、PC の入力モジュールに送る。

PC の入力モジュール（AD 変換モジュール）では第３章で述べたように、変換特性に選択制を持っているが、ここでは、スケーリングを行わず、±10V→±20,000 ポイントの直線変換を採用する。

これを引き継いだ CPU モジュールでは、このディジタル化された入力信号を式(8.1)の PID 制御の基本式[8]を適用して演算する。

$$u(t)=K_c\left[e(t)+\frac{1}{T_i}\int e(t)dt+T_d\frac{de(t)}{dt}\right] \text{-------------(8.1)}$$

K_c : proportional gain

T_i : reset time

T_d : rate time

$u(t)$: controller output

$e(t)$: error signal　(input)

その結果を出力モジュール（DA 変換モジュール）に引き渡す。

DA 変換モジュールでは、AD モジュールと反対に、±20,000 ポイント→±10V に変換し、PC 部の出力として、駆動部の AC サーボモータ用ドライバーに信号を送る。この場合もスケーリングは行っていない。

AC サーボドライバでは、速度制御方式を採用し、入力信号電圧±10V をモータの回転数±3000rpm に直線変換する。モータ軸に取り付けられたスライドスクリューが 9mm／回転の割合で直線運動に変換する。これにより、ステージの位置を制御する。

ここで、ステップ入力を与えた場合の出力特性を PID 制御のそれぞれの係数を変えて試みた場合について示す。

表 8.1 PID 制御係数の設定例

	比例係数	積分係数	微分係数
グラフ１	0.3	0.03	2.0
グラフ２	1.5	0.05	2.0
グラフ３	2.0	0.05	1.0

上表での係数は、式(8.1)で次のように計算したものである。

K_c ：比例係数

K_c/T_i ：積分係数

$K_c\,T_d$ ：微分係数

縦軸の電圧値は、ステージの基準点からの変位で、3mm/1V を表している。ゲインを上げると出力が振動的になる様子がよく表されている。

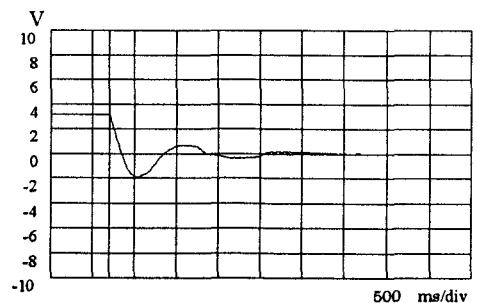



図　8.1　ステップ入力グラフ１

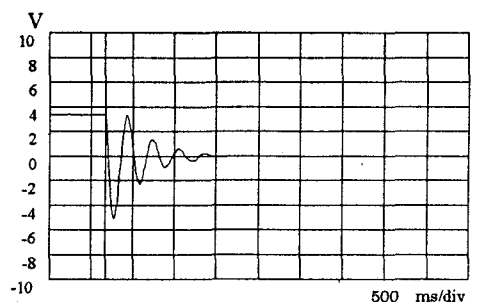



図 8.2　ステップ入力グラフ２

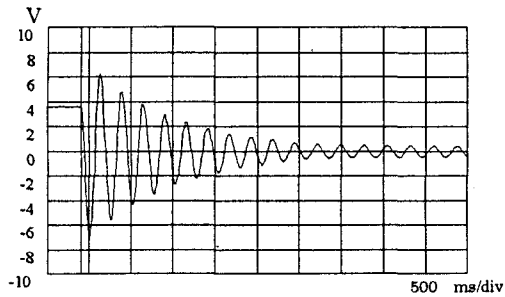



図 8.3　ステップ入力グラフ３

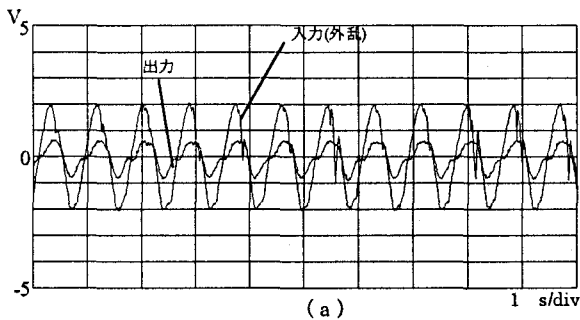
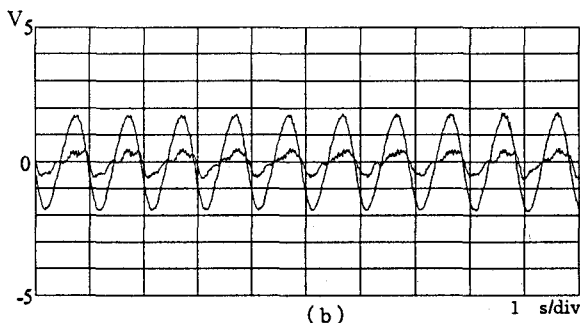
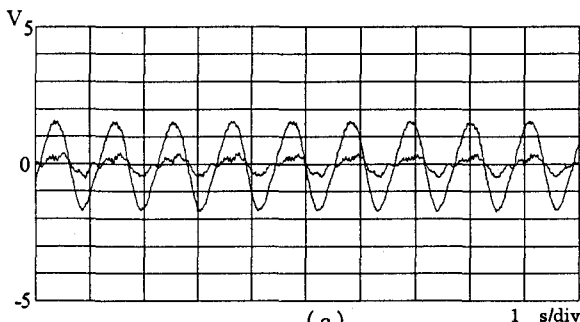
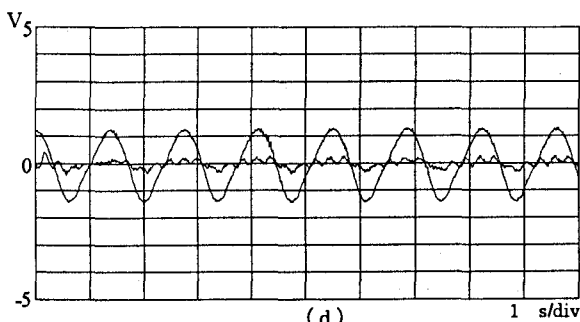
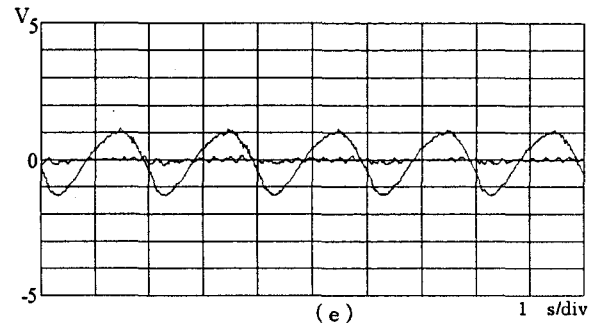
表 8.1・グラフ１の場合の設定で、外乱発生装置を働かせた場合の入力と出力の関係を２チャンネルのオシロで計測した例を次に示す。グラフでは、出力波形が見やすいように入力の振幅を 1/3 程度に縮小して表示してある。

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

図 8.4　外乱発生時の周波数特性グラフ

（a）から（e）へと外乱の周波数が低くなるにつれ、追従性が良くなり、出力の変動が小さくなっている。

９．発展性

・３次元実験装置への拡張

もともと水中航走体をイメージしての実験装置であるので、現在の２次元的装置を３次元にリフォームすることを前提に構造や配置を考えてきている。第２章に示した外観図からも分かるように、外乱発生装置 ― センサ ― アクチュエータの一連の機械的な繋がりのブロックと同じものを直角方向に増設することによって、簡単に３次元に格上げ可能である。３次元モデルの応用の一例としては、広がりと深さのある海域の海水温度分布の自動計測用制御装置の机上実験などに使用できると考えている。しかし、一般実験に使うことを考えると、大抵の場合は２次元モデルで十分である。２次元として使いづらい構造にならぬよう工夫したい。

・データ・アクイジション装置の実験用に

動物の行動観察や痴呆性老人の徘徊防止などには、小形のDA(Data Acquisition)装置があれば重宝されるであろう。最近では、カメラの手ぶれ防止やラジコン模型やカーナビ用に超小型のセンサが開発され、比較的容易に手にはいるようになった。これらのセンサの性能確認と DA 装置開発への実験装置として使用したいと思っている。その為、本装置に位置情報収録装置を取り付けたい。

・一般実験に

手動でもなかなか困難な制御、例えば複雑な経路や、逃げるターゲットの追尾などを自動で見事に制御できるのを目の当たりにすることは感激である。本装置を低学年の実験に使用してそんな体験を電子制御を選択した学生に味わすことが出来ればと考えている。

１０．まとめ

以上、２次元安定ステージを実験装置としてみての紹介をした。振り返ってみて残念に思うことは、横河電機 PC"PC-M3"のアナログ CPU モジュールが YM-BASIC でしか働かないことである。電子制御工学科では、教育用言語として C 言語に統一したことからも、たとえ実験装置としてのみの用途としても使用勝手が悪いと言えよう。パソコンとしては PC98 を使用しているが、これはす

でにDOS-V用のモジュールが売り出されているので問題はない。今後もいろいろなセンサを搭載しての制御実験や、センサシステムの評価装置として活用願えればと思っている。

本装置の実験装置としての特徴をまとめると次の通りである。

1．外乱発生、センサ、演算装置およびアクチュエータが一体として組み込まれている。
2．外乱の周期、センサの種類、制御演算などは自由に選択できる自由度をもつ。
3．３次元ステージへと、あるいはデータアクイジション装置へと発展性を持つ。

参考文献

(1)横河電機「レンジフリーコントローラ FA-M3」取扱説明書
(2)安川電機「AC Servo Drive Σ-series」取扱説明書
(3) 安東・原田：２次元安定ステージ実験装置の開発
（平成７年度　電子制御工学科卒業論文）
(4) 池口・岸本：２次元安定ステージ装置の安定性改善に関する調整法　（平成８年度　電子制御工学科卒業論文）
(5)有家・遠藤・木山：圧電振動ジャイロと加速度センサによる姿勢制御　（平成10年度　電子制御工学科卒業論文）
(6)久保島毅：ACサーボモータの制御方法と応用、近代図書
(7)オムロン「レーザ変位センサ　3Z4M-J」取扱説明書
(8) J.A.Miller,A.M.Lopez,C.L.Smith, and P.W.Murril:
A Comparison of Controller Tuning Techniques,
Control Engineer